

Таблица 2

Емкостный ток замыкания в сети, А	Значения резистора в нейтрали, кОм, при напряжении сети	
	6 кВ	10 кВ
0,7÷3,5	2	3
5÷6	1	2
7÷8	1	1,5
9÷10	0,75	1

за рубежом (США, Канада, ПНР) подтверждает целесообразность выбора бетэлового резистора в качестве основного элемента устройства для оптимизации режима нейтрали сетей 6—10 кВ.

В табл. 2 приведены рекомендуемые значения сопротивлений резисторов в нейтрали, соответствующих оптимальному току и условиям табл. 1, в зависимости от напряжения сети и емкостного тока замыкания. Даны ближайшие значения сопротивлений, кратные предпочтительному для изготовления номинальному ряду.

Годовой экономический эффект от применения резисторных устройств оптимизации нейтрали в карьерных распределительных сетях 6—10 кВ за счет снижения вероятного ущерба от перерывов электроснабжения по причинам неселективных срабатываний защит от 033 и переходов 033 в многоместные повреждения составляет 20—25 тыс. руб. на один карьер или угольный разрез (4÷5 тыс. руб. на одно резисторное устройство при его стоимости не более 0,3 тыс. руб.). Только по угольной промышленности ожидаемый народнохозяйственный экономический эффект составит более 2 млн. руб. в год.

Выводы. 1. Существующий режим нейтрали карьерных распределительных сетей 6—10 кВ с емкостными токами замыкания до 10 А является неудовлетворительным, не соответствует условиям минимума повреждений элементов сети и электрооборудования, а также нормального функционирования релейной защиты, что приводит к значительному экономическому и техническому ущербу при эксплуатации.

2. Создание дополнительного активного тока замыкания на землю включением в нейтраль сети высокоомного резистора оптимального значения является комплексной и наиболее эффективной мерой повышения надежности электроснабжения и безопасности эксплуатации в карьерных распределительных сетях.

3. Оптимальным является значение дополнительного активного тока замыкания, равное 0,6 емкостного тока, выбранное из условия минимума тока через тело человека при прикосновении к фазе сети, ограничения кратности перенапряжений до 2,3—2,4 при дуговых и металлических 033, ликвидации феррорезонансных процессов, обеспечения условий надежной работы селективных устройств защиты от 033, а также ограничения напряжений прикосновения (и шага) на заземленных корпусах электрооборудования при дуговых замыканиях на землю.

4. Наиболее рациональным с точки зрения простоты, надежности работы, стоимости, удобства эксплуатации и других предъявленных выше требований является устройство с высокоомным бетэловым резистором, подключаемое к нулевой точке трансформатора собственных нужд (типа ТМ 25/6, ТМ 40/6 и др.) на каждой подстанции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самойлович И. С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров. — М.: Недра, 1976.
2. Омельченко В. И., Могильный Г. М. Анализ отключений релейной защиты отходящих линий карьерных подстанций 35/6 Орджоникидзевского ГОК. — В кн.: Электробезопасность на горнорудных предприятиях черной металлургии СССР, Днепропетровск, 1979.
3. Горюнов В. С., Березин А. А., Рощин А. С. Аварийные режимы в карьерных распределительных сетях 6 кВ. — В кн.: Безопасность и надежность электроснабжения горнорудных предприятий. Днепропетровск, 1982.
4. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1959.
5. Лихачев А. Ф. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. — М.: Энергия, 1971.
6. Сирота И. М. Влияние режимов нейтрали в сетях 6—35 кВ на условия безопасности. — В кн.: Режимы нейтрали в электрических системах. — Киев: Наукова думка, 1974.
7. Беляков Н. Н. Перенапряжения от заземляющих дуг в сетях с активным сопротивлением в нейтрали. — Труды ВНИИЭ, 1961, вып. 11.
8. Сирота И. М., Ягудаев Б. М., Назаров В. В. Перенапряжения при дуговых однофазных замыканиях и режимы нейтрали в некомпенсированных сетях 3—10 кВ. — В кн.: Электробезопасность на горнорудных предприятиях черной металлургии СССР. — Днепропетровск, 1979.
9. Сирота И. М. Феррорезонансные процессы в электрических некомпенсированных сетях. — В кн.: Режимы нейтрали в электрических распределительных сетях напряжением до 35 кВ. Тезисы докладов научно-технич. конф. — Киев, 1980. [01.03.84]



УДК 621.314.572.018.782.3.001.24

Обеспечение минимальной длительности переходного режима однофазного инвертора тока

ДОЛБНЯ В. Т., доктор техн. наук

Харьковский политехнический институт

При проектировании различного рода устройств особое место занимает исследование переходных процессов. Обеспечение минимальной длительности перехода системы из одного состояния в другое непосредственно способствует повышению производительности устройства. В автономных инверторах форма кривой выходного напряжения или тока будет тем качественнее, чем меньше затухание в силовой цепи преобразователя. С другой

стороны, при малых затуханиях продолжительность переходных процессов велика. В ряде случаев это время может стать соизмеримым с длительностью технологического процесса, и тогда работа преобразователя будет малоэффективной. В этой связи особый интерес представляют меры, позволяющие принудительно вывести систему на установившийся режим с временем, значительно меньшим, чем это определяется естественным раз-

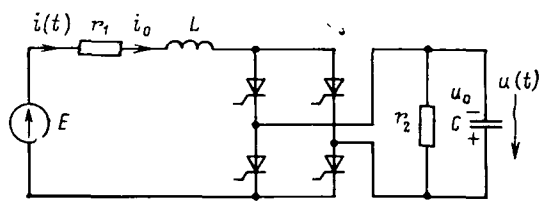


Рис. 1

вitiем переходного процесса. Помимо использования средств автоматического управления и регулирования заслуживает внимания способ, связанный с изменением в процессе работы тех или других параметров собственно преобразователя: напряжения источника питания, частоты переключения коммутатора, значения параметров элементов, образующих силовую цепь.

Принципиальная возможность выхода преобразователя на установившийся режим в течение одного произвольно выбранного такта была установлена в [1 и 2]. Определение условий осуществления такого режима производилось при помощи отображения переходного процесса на плоскость комплексного переменного. Более подробные исследования в случае изменения различных параметров преобразователя, выполненные Е. И. Соколом, показали, что для выхода на установившийся режим в лучшем случае может потребоваться всего два такта, начиная от момента включения преобразователя: за время первого такта выходная величина (ток или напряжение) достигает определенного значения, а второй такт является уже тактом установившегося режима.

Перевод инвертора на установившийся режим путем скачкообразного изменения напряжения источника питания или параметров силовой цепи можно осуществлять только путем применения дополнительных устройств, причем довольно громоздких. Самым удобным и легко выполнимым явился бы способ, основанный только лишь на изменении длительности тактов работы тиристорного коммутатора. Ниже излагается решение этой задачи применительно к однофазному инвертору тока, содержащему два силовых реактивных элемента, и приводится метод, позволяющий дать ответы на следующие вопросы:

возможен ли выход на установившийся режим сразу же после первого такта работы преобразователя?

в каких случаях такой выход возможен лишь после двух (или более) первых тактов работы?

как рассчитать длительность тактов для выхода на установившийся режим за минимальное время?

как решить предыдущую задачу, если частота работы преобразователя при установившемся режиме заранее задана?

В случае более сложного вида нагрузки принципиально возможно применение той же методики с учетом более сложного характера отображения на комплексную плоскость. В [3] рассмотрен случай, когда исследуемая схема имеет третий порядок.

Отображение переходного процесса на плоскость комплексного переменного. На рис. 1 приведена схема однофазного инвертора тока, характеризуемая следующими уравнениями для выходного напряжения $u(t)$ и входного тока $i(t)$, справедливыми для каждого отдельного такта работы:

$$u(t) = \frac{Er_2}{r_1 + r_2} + \left[\frac{i_n}{\alpha C} - \frac{u_n r_1}{\alpha L} + u_n - \frac{Er_2}{r_1 + r_2} \right] \frac{\alpha}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t -$$

$$- \left[u_n + \frac{Er_2}{r_1 + r_2} \right] e^{-\alpha t} \cos \omega t; \quad (1)$$

$$i(t) = \frac{E}{r_1 + r_2} + \left[\frac{u_n + E}{\alpha L} + \frac{i_n}{\alpha Cr_2} - i_n - \frac{E}{r_1 + r_2} \right] \times \\ \times \frac{\alpha}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t + \left[i_n - \frac{E}{r_1 + r_2} \right] e^{-\alpha t} \cos \omega t, \quad (2)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Cr_2} + \frac{r_1}{L} \right); \quad \omega = \sqrt{\frac{r_1 + r_2}{r_2 CL} - \alpha^2};$$

u_n и i_n — начальные значения напряжения на конденсаторе и тока в индуктивности для каждого такта работы.

/ Суть отображения переходного процесса на комплексную плоскость состоит в том, что исследуемая переходная величина представляется в виде мнимой части некоторой комплексной величины, изображаемой точкой на плоскости комплексного переменного. Отображение осуществляется подстановкой,

$$e^{-\alpha t} \sin \omega t = \text{Im} \{ e^{pt} \}$$

и

$$e^{-\alpha t} \cos \omega t = \text{Im} \{ j e^{pt} \},$$

где $p = -\alpha + j\omega$.

При такой замене уравнение (1), например, примет вид:

$$\dot{U}(t) = j \frac{Er_2}{r_1 + r_2} + M_n e^{pt}, \quad (3)$$

$$\text{где } M_n = \frac{\alpha}{\omega} \left[\frac{i_n}{\alpha C} - \frac{u_n r_1}{\alpha L} + u_n - \frac{Er_2}{r_1 + r_2} \right] - j \left[u_n + \frac{Er_2}{r_1 + r_2} \right].$$

В момент включения преобразователя ($t=0$) условия нулевые и

$$M_0 = - \frac{Er_2}{r_1 + r_2} \left(\frac{\alpha}{\omega} + j \right),$$

а изображающая точка располагается на вещественной оси:

$$\dot{U}_0 = - \frac{\alpha}{\omega} \frac{Er_2}{r_1 + r_2}.$$

/ За время первого такта T_1 изображающая точка в соответствии с выражением (3) переместится в новое положение:

$$\dot{U}_1 = j \frac{Er_2}{r_1 + r_2} + M_0 e^{pT_1}. \quad (4)$$

[В момент переключения коммутатора изображающая точка переходит в новое положение \dot{U}'_1 и за время второго такта снова перемещается в соответствии с уравнением (3). В [1] показано, что переход изображающей точки от \dot{U}_n к \dot{U}'_n совершается по прямой с угловым коэффициентом

$$\text{tg } \varphi = \frac{\omega (Cr_1 r_2 + L)}{\alpha (Cr_1 r_2 - L)}$$

таким образом, что

$$\text{Im} \{ \dot{U}'_n \} = - \text{Im} \{ \dot{U}_n \}; \quad (5)$$

$$\text{Re} \{ \dot{U}'_n \} = \text{Re} \{ \dot{U}_n \} - 2 \text{Im} \{ \dot{U}_n \} \text{ctg } \varphi.$$

Перемещение изображающей точки на протяжении двух тактов показано на рис. 2. Установившийся режим наступает тогда, когда изображающая точка, занимая в

начале каждого такта положение U_∞ и перемещаясь за время такта T_∞ в соответствии с уравнением (3) в новое положение \dot{U}_∞ , совершает в момент переключения коммутатора коммутационный переход снова в положение \dot{U}_∞ (рис. 2).

В [2] показано, что в этом случае

$$\dot{U}_\infty = j \frac{Er_2}{r_1 + r_2} - \frac{2Er_2 e^{j\varphi + pT_\infty}}{(r_1 + r_2)(1 - e^{pT_\infty}) \sin \varphi},$$

откуда

$$\text{Im}\{\dot{U}_\infty\} = \frac{Er_2}{r_1 + r_2} \frac{\text{ch } \alpha T_\infty - \cos \omega T_\infty}{\text{sh } \alpha T_\infty + \text{ctg } \varphi \sin \omega T_\infty}; \quad (6)$$

$$\text{Re}\{\dot{U}_\infty\} = \frac{Er_2}{r_1 + r_2} \frac{\sin \omega T_\infty + (e^{-\alpha T_\infty} - \cos \omega T_\infty) \text{ctg } \varphi}{\text{sh } \alpha T_\infty + \text{ctg } \varphi \sin \omega T_\infty}. \quad (7)$$

Исследования показывают, что перемещение точки \dot{U} , изображающей на рис. 2 переходное напряжение на выходе, в то же время является перемещением точки \dot{I} , изображающей входной ток, но в новой системе координат, вещественная ось которой проходит через конец вектора \dot{M}_0 параллельно прямой коммутационного перехода, а мнимая — через точку $j \frac{Er_2}{r_1 + r_2}$ нормально к этой прямой.

О возможности выхода на установившийся режим после первого такта. Отображение переходного процесса на комплексную плоскость является, по-видимому, единственным пока методом, позволяющим ответить на этот вопрос. Из рис. 2 следует, что если удалось бы подобрать длительности первого такта T_1 и такта при установившемся режиме T_∞ такими, чтобы изображающие точки \dot{U}_1 и \dot{U}_∞ совпали, то установившийся режим мог бы начаться сразу же после первого такта. Для реализации такого совпадения следует прежде всего построить на комплексной плоскости множество точек $\{\dot{U}_1\}$, пользуясь формулами (8) и (9), полученными после разложения (3) на вещественную и мнимую части:

$$\text{Re}\{\dot{U}_1\} = \frac{Er_2}{r_1 + r_2} \left(\sin \omega T_1 - \frac{\alpha}{\omega} \cos \omega T_1 \right) e^{-\alpha T_1}; \quad (8)$$

$$\text{Im}\{\dot{U}_1\} = \frac{Er_2}{r_1 + r_2} \left(1 - \cos \omega T_1 + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega T_1 \right) e^{-\alpha T_1}. \quad (9)$$

Годограф множества $\{\dot{U}_1\}$ на комплексной плоскости

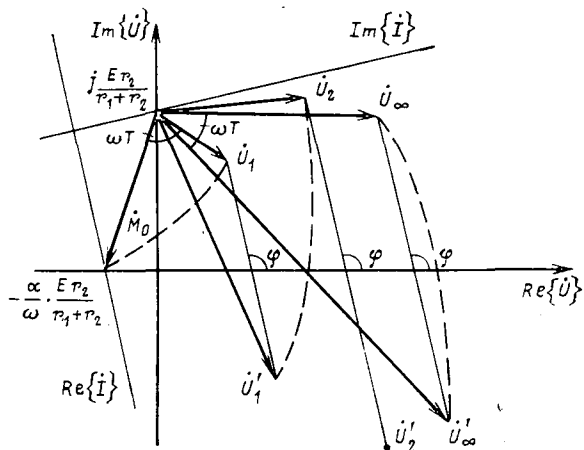


Рис. 2

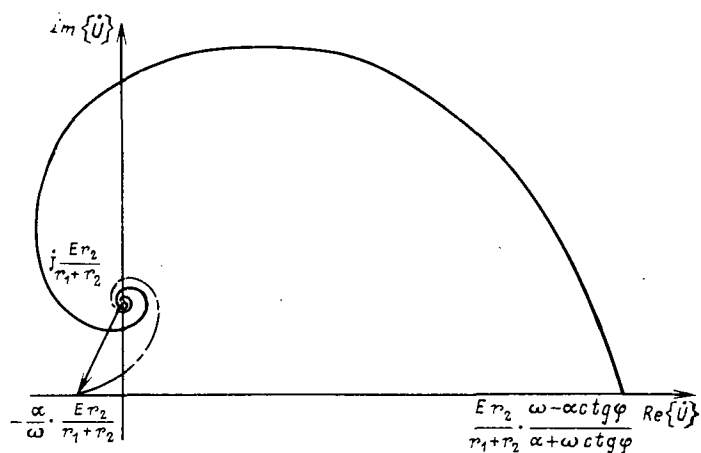


Рис. 3

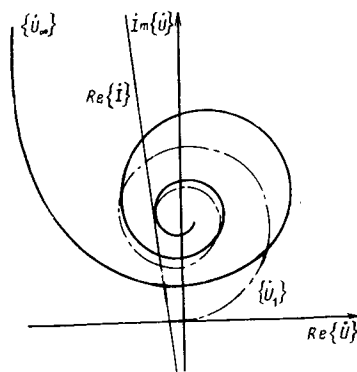


Рис. 4

имеет вид спирали (рис. 3), начинающейся при $T_1 = 0$ в точке $-\frac{\alpha Er_2}{\omega(r_1 + r_2)}$ и заканчивающийся при $T_1 = \infty$ в точке $j \frac{Er_2}{r_1 + r_2}$. Таким же образом, используя выражения (6) и (7), строится годограф множества $\{\dot{U}_\infty\}$, начинающийся в точке $\frac{Er_2}{r_1 + r_2} \frac{\omega - \alpha \text{ctg } \varphi}{\alpha + \omega \text{ctg } \varphi}$ и заканчивающийся в точке $j \frac{Er_2}{r_1 + r_2}$. Очевидно, что пересечение обоих множеств свидетельствует о принципиальной возможности выхода на установившийся режим после первого такта работы при строго конкретных значениях T_1 и T_∞ , соответствующих точкам пересечения. Если же множества не пересекаются, такой выход невозможен.

Исследования показывают, что пересечение множеств $\{\dot{U}_1\}$ и $\{\dot{U}_\infty\}$ зависит от коэффициента затухания α . При больших затуханиях годографы не пересекаются, как это изображено на рис. 3. При малых затуханиях годографы могут пересекаться в общем случае в нескольких точках (рис. 4), что однако не означает физической реализуемости установившегося режима после первого такта, так как первое же пересечение наступает только после того, как годограф $\{\dot{U}_\infty\}$ дважды пересечет ось $\text{Re}\{\dot{I}\}$. Последнее обстоятельство предполагает существование входного тока, протекающего в индуктивности L в направлении, противоположном проводимости силовых вентилях тиристорного переключателя, что не имеет физического смысла. Таким образом, следует исключить возможность выхода на установившийся режим, начиная со второго такта, но эта задача может быть

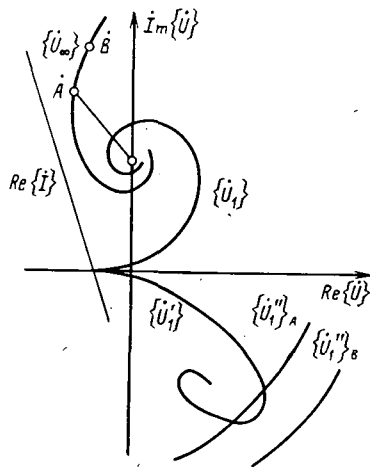


Рис. 5

решена за три или большее число тактов, включая первый.

Изложенный ниже метод решения подобной задачи иллюстрируется на примере инвертора с параметрами $E=500$ В; $r_1=0,01$ Ом; $L=2,2 \cdot 10^{-3}$ Гн; $C=6,3 \cdot 10^{-4}$ Ф; $r_2=3$ Ом.

Обеспечение установившегося режима при заданных параметрах преобразователя за минимальное число тактов. Пусть задана длительность такта при установившемся режиме T_∞ , которой соответствует определенное значение U_∞ (точка A на рис. 5). Эта точка не является пересечением множеств $\{U_1\}$ и $\{U_\infty\}$, следовательно, установившегося режима с такой частотой за два такта достичь нельзя.

Определим, может ли изображающая точка получить значение \dot{A} в конце второго такта. Для этого прежде всего построим множество изображающих точек $\{\dot{U}_1'\}$, пользуясь соотношениями (5) для коммутационного перехода. Годограф множества $\{\dot{U}_1'\}$ приведен на рис. 5. Чтобы выяснить, каким образом перейти в точку \dot{A} из множества $\{\dot{U}_1'\}$, выполним перемещение изображающей точки в обратном направлении. Для этого определим модуль вектора, соединяющего точки $j \frac{Er_2}{r_1 + r_2}$ и \dot{A} с координатами $\text{Re}\{\dot{U}_\infty\}$ и $\text{Im}\{\dot{U}_\infty\}$:

$$M_{\infty} = \sqrt{\operatorname{Re}^2 \{\dot{U}_{\infty}\} + \left[\operatorname{Im} \{\dot{U}_{\infty}\} - \frac{Er_2}{r_1 + r_2} \right]^2}.$$

Угловой коэффициент этого вектора

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\operatorname{Im} \{\dot{U}_{\infty}\} - \frac{Er_2}{r_1 + r_2}}{\operatorname{Re} \{\dot{U}_{\infty}\}},$$

$$\dot{U}_\infty = j \frac{Er_2}{r_1 + r_2} + M_\infty e^{j\psi}.$$

Чтобы переместиться в обратном направлении за время T_2 от заданной точки A к какой-либо точке географа $\{U_1'\}$, следует вектор $M_\infty e^{i\psi}$ умножить на $e^{-\rho T_2}$, придавая T_2 различные значения. При этом получим множество точек $\{U_1'\}$, вычислив их вещественные и мнимые части по формулам

$$\operatorname{Re} \{\dot{U}_1''\} = M_\infty e^{\alpha T_2} \cos(\psi - \omega T_2);$$

$$\operatorname{Im}\{\dot{U}_1''\} = \frac{Er_2}{r_1 + r_2} + M_\infty e^{\alpha T_2} \sin(\psi - \omega T_2).$$

Пересечения множеств $\{\dot{U}_1^*\}$ и $\{\dot{U}_1'\}$ определяют значения T_1 и T_2 , при которых можно подойти к установившемуся режиму в конце второго такта (рис. 5). Для уменьшения общего времени переходного процесса из двух пересечений целесообразно выбрать то, которое соответствует меньшим длительностям T_1 и T_2 . Рис. 5 иллюстрирует случай, когда при заданной частоте переключения коммутатора в установившемся режиме ($T_\infty=0,0045$) найдены описанным выше путем значения $T_1=0,00247$ и $T_2=0,00409$, приводящие к установившемуся режиму после первых двух тактов работы.

Может, однако, случиться, что множества $\{\dot{U}_1^*\}$ и $\{\dot{U}_1'\}$ не пересекаются, как это показано на рис. 5 для заданной точки \dot{B} или любой другой, лежащей выше нее на годографе множества $\{\dot{U}_\infty\}$. Это будет свидетельствовать о том, что получить установившийся режим с частотой, соответствующей точке \dot{B} , или большей, невозможно за три первых такта. В этом случае следует произвольно выбрать длительность одного из промежуточных тактов (например, T_2), а длительность второго промежуточного такта T_3 рассчитать вышеизложенным способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долбня В. Т., Сокол Е. И. Применение топологического метода для анализа переходных процессов в инверторах тока и напряжения. — В кн.: Оптимизация полупроводниковых преобразовательных устройств. — Киев: Ин-т электродинамики АН УССР, 1979, с. 54—56.
2. Долбня В. Т., [Сокол Е. И. Расчет процесса конечной длительности в однофазном инверторе тока. — В кн.: Современные проблемы преобразовательной техники. — Киев: Наукова думка, 1980, с. 42—44.
3. Долбня В. Т. Пуск инвертора тока за минимальное время. — В кн.: Тезисы докладов на III-й Всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы преобразовательной техники». — Киев: Изд-во ИЭД АН УССР, 1983, т. III, с. 43—46.

[14.12.83]

Управляемый выпрямитель с искусственной коммутацией

БУЛАТОВ О. Г., канд. техн. наук, ШИТОВ В. А., канд. техн. наук

Московский энергетический институт

Известным недостатком управляемых выпрямителей является потребление ими реактивной мощности, обусловленное отставанием основной гармоники сетевого то-

ка от синусоиды питающего напряжения. Использование искусственной коммутации позволяет включать вентили управляемого выпрямителя с опережением относи-